

*Запропонована методика оптимізації параметрів кульового автобалансира для мінімізації функціонала якості роботи роторної машини з використанням теорії планування багатofакторного експерименту. Приведена її реалізація на 3D моделі соковижималки: описана «чорна скриня», проведено аналіз результатів експериментів за допомогою програм STATISTICA\_6, MathCad. Дана методика може бути стандартною при оптимізації параметрів шарових автобалансирів роторних машин*

*Ключові слова: відцентрова соковижималка, віброприскорення, автобалансир, багатofакторний експеримент, функціонал якості, оптимізація параметрів*

*Предложена методика оптимизации параметров шарового автобалансира для минимизации функционала качества работы роторной машины с применением теории планирования многофакторного эксперимента. Приведена ее реализация на 3D модели соковыжималки: описан «черный ящик», проведен анализ результатов экспериментов с помощью программ STATISTICA\_6, MathCad. Данная методика может быть стандартной при оптимизации параметров шаровых автобаланси- ров роторных машин*

*Ключевые слова: центробежная соковыжималка, виброускорение, автобалансир, многофакторный эксперимент, функционал качества, оптимизация параметров*

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ 3D МОДЕЛИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СОКОВЫЖИМАЛКИ С АВТОБАЛАНСИРОМ МИНИМИЗАЦИЕЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ВИБРОУСКОРЕНИЯ

**В. В. Гончаров**

Кандидат физико-математических наук, доцент  
Кафедра высшей математики\*  
E-mail: matkora@yandex.ru

**Г. Б. Филимонихин**

Доктор технических наук, профессор  
Кафедра деталей машин и прикладной механики\*  
E-mail: filimonikhin@narod.ru, fgb@online.ua

\*Кировоградский национальный  
технический университет

пр. Университетский, 8, г. Кировоград,  
Украина, 25006

## 1. Введение

В процессе работы многих роторных машин возникает значительный, изменяющийся как по величине, так и расположению, дисбаланс и появляются вибрации корпуса машины. Это приводит к снижению их производительности и износу деталей. Поэтому целесообразно уравнивать вращающиеся детали таких машин на ходу - в процессе эксплуатации. При этом нужно иметь методику поиска оптимальных параметров уравнивающих устройств.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Для уравнивания на ходу быстровращающихся роторов используются пассивные автобалансиры (автобалансиры) [1, 2]. Корректирующие грузы в таких устройствах сами приходят в положение, в котором уравнивают ротор и вращаются с ним как одно целое, пока не начнет меняться дисбаланс или не появятся возмущения иного происхождения [1 – 4].

В работе [5] предложена модернизация широкого класса соковыжималок с цилиндрическим фильтром-

ситом (ситом) [6, 7], выпускаемых в соответствии с ДСТУ 3141-95 (ГОСТ 18199-95), путем замены платформы, на которой устанавливается фильтр-сито (сито), платформой, совмещенной с шаровым автобалансиром. В работе [8] изложена методика по наладке и тестированию стенда модернизированной соковыжималки. В работе [9] в системе автоматического проектирования SolidWorks [10] создана 3D модель модернизированной соковыжималки и с использованием модуля Cosmos Motion [11] проведена ее обработка, наладка и тестирование. Модель предназначена для компьютерного моделирования динамики соковыжималки с автобалансиром.

В данной работе, для нахождения оптимальных параметров автобалансира, предлагается методика, учитывающая особенности работы роторных машин с автобалансирами и использующая теорию многофакторных экспериментов. Она включает: описание «черного» ящика (выбор функционала качества, выбор управляющих факторов и задание области их изменения); планирование и проведение многофакторного эксперимента [12, 13]; исследование полученных результатов с помощью программного пакета для статистического анализа данных STATISTICA\_6 и системы компьютерной алгебры MathCad. Предложенная методика может рассматриваться как стандартная при

оптимизации параметров автобалансиоров различных роторных машин.

### 3. Особенности использования натурального стенда соковыжималки с автобалансиром и ее 3D модели при поиске оптимальных параметров соковыжималки

На натурном стенде можно исследовать как некоторые модельные (частные) варианты постоянного по величине и расположению дисбаланса на сите так реальный процесс получения сока из перерабатываемого сырья. При этом:

- а) учитывается влияние случайных величин:
  - колебания частоты вращения вала в результате изменения как сил сопротивления при истирании перерабатываемого сырья, так и главных моментов инерции сита в результате изменения как массы сырья находящейся на сите, так и его расположения;
  - изменение дисбаланса сита в процессе работы соковыжималки;
  - колебания напряжения в электрической сети, что приводит к колебаниям электрического поля, создаваемого обмоткой привода, и частоты вращения вала;
- б) учитывается влияние постоянных величин:
  - не идеальность изготовления поверхности беговой дорожки шаров, что приводит к непостоянству силы сопротивления качению;
  - наличие собственного дисбаланса ротора, сита и корпуса АБ;
  - не осесимметричность корпуса соковыжималки - наличие конденсаторов, лотка для подачи перерабатываемого сырья, приспособления и отверстие для выброса мезги, места для установки емкости под сок;
  - возможное различие в силовых воздействиях опор корпуса и т.д.;
- в) замерять можно только проекции виброускорения в контрольных точках корпуса соковыжималки;
- г) менять параметры соковыжималки довольно сложно - в некоторых случаях это требует очень больших временных, трудовых и материальных затрат.

На 3D модели соковыжималки в основном можно изучать только модельные ситуации - при фиксированном дисбалансе или изменяющемся по заданному закону. Но при этом можно:

- изменять все параметры в широких пределах с произвольным (достаточно малым) шагом изменения при минимальных временных, трудовых и материальных затратах;
- проводить абсолютно воспроизводимые эксперименты;
- замерять практически все характеристики вибрации любой точки произвольной детали, как не вращающейся, так и вращающейся и т.д.

При поиске оптимальных параметров соковыжималки с автобалансиром вначале проводится оптимизация параметров 3D модели, а затем - проверка и уточнение полученных результатов на натурном стенде.

### 4. Выбор целевой функции Q

В качестве целевой функции Q необходимо выбирать величину, характеризующую качество работы

соковыжималки (дисбаланс или вибрации, возникающие в процессе работы) и которую можно замерять в процессе эксперимента как на 3D модели соковыжималки [9] так и на стенде модернизированной соковыжималки [8]. На стенде модернизированной соковыжималки можно замерять только зависимость от времени составляющих  $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$  ( $m/c^2$ ) поступательного виброускорения  $a(t)$  в определенных фиксированных точках корпуса соковыжималки, а на 3D модели можно измерять все - линейные и угловые виброускорения и виброскорости произвольной точки любой детали соковыжималки (подвижной и не подвижной), линейные и угловые расстояния между шарами и др. Будем замерять компоненты  $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$  точки, расположенной на горизонтальной поверхности верхней крышки соковыжималки, максимально удаленной от оси вращения сита (ГОСТ 20815-93, ГОСТ 10816-1-97). Имея составляющие  $a_x(t), a_y(t), a_z(t)$ , можно находить **мгновенное значение** модуля виброускорения  $a(t) = \sqrt{a_x^2(t) + a_y^2(t) + a_z^2(t)}$ .

Зависимость  $a(t)$  дает возможность определять следующие целевые функции:

$$\bar{a} = \frac{1}{T} \int_0^T a(t) dt, \quad \tilde{a} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt},$$

$$\bar{a}_y = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt, \quad \tilde{a}_y = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt}, \quad (1)$$

где  $\bar{a}$ ,  $\tilde{a}$ ,  $\bar{a}_y$ ,  $\tilde{a}_y$  - соответственно, среднее значение модуля виброускорения ( $\bar{a}$ ,  $\bar{a}_y$ ) и среднее квадратическое значение виброускорения ( $\tilde{a}$ ,  $\tilde{a}_y$ ) за время работы соковыжималки или ее 3D модели ( $\bar{a}$ ,  $\tilde{a}$ ) (ГОСТ 24346-80) и при установившемся движении ( $\bar{a}_y$ ,  $\tilde{a}_y$ ); T - время работы соковыжималки или ее 3D модели;  $t_1 > t_y, t_2 > t_y$ , ( $t_2 \gg t_1$ ) - произвольные моменты времени установившегося движения;  $t_y$  - время наступления установившегося движения.

В данной работе эффективность работы автобалансиора определяется из анализа величины  $\tilde{a}_y$  - среднего квадратического значения виброускорения при установившемся движении (далее - установившегося виброускорения). Чем меньше эта величина, тем качественнее автобалансир уравнивает сито с отжатой массой.

### 5. Анализ параметров, влияющих на целевую функцию, выбор факторов

Из всех параметров 3D модели, задаваемых при ее создании и влияющих на целевую функцию  $\tilde{a}_y$ , имеет смысл рассматривать только те, которые можно изменять на стенде соковыжималки без коренного изменения ее конструкции [8]:

- параметры опор корпуса - коэффициенты сил упругости и вязкости опор корпуса  $k_o$ ,  $b_o$ , расстояние от продольной оси ротора до опоры  $R_{om}$ ;
- параметры корпуса автобалансиора - масса корпуса автобалансиора  $m_b$ , расстояние между плоскостью движения шаров и дном сита d, радиус беговой дорожки шаров R;
- параметры шаров автобалансиора - количество шаров в автобалансире n; масса шара m; диаметр

шара  $D$ ; коэффициент сил вязкого сопротивления, препятствующих относительному движению шаров  $b_b$ ;

- параметры дисбаланса, моделируемого точечной массой, – масса  $m_d$  и высота  $h$  расположения точечной массы над дном сита;

- отношение балансирующей емкости автобалансира ( $S_b$ ) к величине дисбаланса ( $m_d d_c / 2$ ) –  $\mu = S_b / (m_d d_c / 2)$ , где  $d_c$  – диаметр сита;

- закон изменения угловой скорости вращения ротора –  $\omega = \omega(t)$ .

Таким образом, в общем случае можно выделить 14 управляемых параметров соковыжималки или ее 3D модели, влияющих на целевые функции вида (1):  $k_o, b_o, R_{оп}, m_b, R, n, m, D, b_b, m_d, h, \mu, \omega(t)$ .

Из конструктивных соображений и вида целевой функции очевидно, что:

а) силы сопротивления относительному движению шаров влияют только на целевые функции  $\bar{a}, \tilde{a}$  и не должны влиять на  $\bar{a}_y, \tilde{a}_y$ ;

б) расстояние  $R_{оп}$  опор корпуса от продольной оси ротора должно быть максимальным;

в) масса корпуса автобалансира  $m_b$  должна быть минимальной;

г) плоскость движения шаров должна находиться как можно ближе к днущу сита (расстояние  $d$  должно быть минимальным);

д) при выполнении шаров из одного материала (стали) их плотность фиксирована, а параметры  $m$  и  $D$  взаимосвязаны;

е) параметры дисбаланса ( $m_d, h$ ) в реальной соковыжималке – переменные (случайные) величины, при этом:

- изменение  $m_d$  имеет смысл рассматривать в пределах  $[0, m_{кр}]$ , где  $m_{кр}$  – масса точки, моделирующей дисбаланс, при которой реальная соковыжималка без автобалансира под действием вибраций начинает перемещаться по опорной горизонтальной поверхности («срывается» с опор);

- высота  $h$  может меняться в пределах  $[0, H]$ , где  $H$  – высота цилиндрической части сита, при этом значение  $h = H$  является самым неблагоприятным для процесса автобалансировки, поскольку при этом появляется наибольший остаточный моментный дисбаланс.

В дальнейшем при моделировании:

а) значения параметров  $m_d, h$  выбираем самые неблагоприятные –  $m_d = m_{кр}, h = H$ ;

б) параметр  $\mu$  принимаем равным 0,9;

в) учитываем, что параметры  $\mu, m_{кр}, R, n$  однозначно определяют диаметр шаров  $D$ ;

г) закон изменения угловой скорости  $\omega(t)$  вращения ротора 3D модели задаем трапецидальным:

$$\omega(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \vee t \geq t_p + t_{кр} + t_b; \\ t \omega_{кр} / t_p & \text{при } t \in [0, t_p]; \\ \omega_{кр} & \text{при } t \in [t_p, t_p + t_{кр}); \\ \omega_{кр}(t_p + t_{кр} + t_b - t) / t_b & \text{при } t \in [t_p + t_{кр}, t_p + t_{кр} + t_b); \end{cases}$$

где  $t_p > 0, t_{кр} > 0, t_b > 0$  – время соответственно разгона, крейсерского хода и выбега ротора;  $\omega_{кр}$  – крейсерская скорость вращения ротора. При этом значения  $t_p, t_b$  и  $\omega_{кр}$  выбираются близкими к соответствующим характеристикам в натурной соковыжималке, а  $t_{кр}$  –

несколько большим времени наступления автобалансировки при самом неблагоприятном наборе параметров (при наибольшем значении  $t_y$ ).

Таким образом, для исследования 3D модели получаем 5 независимых управляющих параметров или факторов  $k_o, b_o, R, n, b_b$  и структурная схема «черного ящика» имеет вид, показанный на рис. 1.

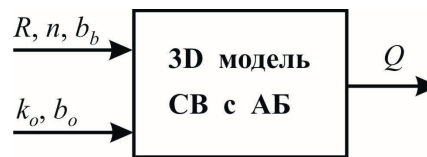


Рис. 1. Структурная схема «черного ящика» для поиска оптимальных параметров 3D модели соковыжималки

Заметим, что параметр  $b_b$  не должен влиять на целевую функцию  $\tilde{a}_y$ . Он специально оставлен для проверки правильности полученных при моделировании результатов.

### 6. Выбор модели регрессии (регрессионного уравнения)

В общем случае модель корреляционной связи между целевой функцией  $Q$  и управляющими факторами  $k_o, b_o, R, n, b_b$  может иметь произвольный, довольно сложный вид –  $\phi(Q) = f(k_o, b_o, R, n, b_b)$ , где  $\phi(\dots), f(\dots)$  – заданные функции своих аргументов. В данной работе в качестве целевой функции рассматривается установившееся виброускорение  $\tilde{a}_y$  и исследуется зависимость вида  $\tilde{a}_y = \tilde{a}_y(k_o, b_o, R, n, b_b)$ . При этом исследованы три простейшие модели регрессии (см. (2)): а – линейная, б – учитывающая эффекты взаимного влияния первого порядка, в – квадратичная:

$$\begin{aligned} \text{а) } \tilde{a}_{yл} &= c_0 + \sum_{i=1}^5 c_i v_i, \text{ б) } \tilde{a}_{yв} = \tilde{a}_{yл} + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^5 c_{ij} v_i v_j, \\ \text{в) } \tilde{a}_{yк} &= \tilde{a}_{yв} + \sum_{i=1}^5 c_{ii} v_i^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $v_1 = k_o, v_2 = b_o, v_3 = R, v_4 = n, v_5 = b_b$ ;  $c_0$  – свободный член регрессии;  $c_i, /i = 1, 5 /$ ,  $c_{ij}, /i, j = 1, 5, j \geq i /$  – коэффициенты регрессии.

### 7. Планирование многофакторного эксперимента

Известно, что для исследования квадратичной зависимости (2, в), нужно рассматривать, по меньшей мере, трехуровневый план эксперимента, то есть каждый из факторов должен принимать три разных значения – минимальное, максимальное и их среднее арифметическое. Оценим диапазоны изменения факторов.

Коэффициент сил упругости опор корпуса  $k_o \in [4; 3]$  Н/мм – при  $k_o < 1$  Н/мм корпус установлен на излишне податливые опоры, что приводит к его значительным отклонениям от равновесного положения, особенно в момент пуска, а при  $k_o > 3$  Н/мм опоры излишне жестки, что приводит к срыву соковыжималки с опор в момент пуска.

Коэффициент сил вязкости опор корпуса  $b_o \in [0,005; 0,045]$  Н с/мм - при  $b_o < 0,005$  Н с/мм очень долго устанавливаются колебания корпуса 3D модели, при  $b_o > 0,045$  Н с/мм корпус 3D модели после отклонении от положения равновесия не совершает колебаний, а плавно возвращается в положение равновесия (силы сопротивления избыточны).

Радиус беговой дорожки шаров  $R: R \in [R_m; R_M]$  - диапазон изменения определяется габаритными размерами дна сита (дорожка минимального радиуса должна насадиться на вал ротора -  $R_m=33,8$  мм, а максимального - не должна превышать размеров дна сита -  $R_M=67,8$  мм).

Количество шаров  $n$ . Очевидно, что минимальное значение -  $n=2$ . Максимальное, таким образом, должно быть четным - выбираем его равным 4, тогда среднее равно 3.

Коэффициент сил вязкого сопротивления  $b_b$ , препятствующих относительному движению шаров:  $b_b \in [5 \cdot 10^{-5}; 5 \cdot 10^{-4}]$  Н с/мм - при  $b_b < 5 \cdot 10^{-5}$  Н с/мм шары очень долго разгоняются до угловой скорости вращения ротора, при  $b_b > 5 \cdot 10^{-4}$  Н с/мм шары очень долго стремятся к балансирующему положению (осуществляют медленное относительное движение).

Значения факторов в размерной форме для трехуровневого эксперимента приведены в левой части колонок 1-5, табл. 1. Соответствующие безразмерные значения факторов (правые части колонок 1-5, табл. 1) получены с помощью преобразования  $\tilde{\varphi}_{i,j} = (\varphi_{i,j} - \varphi_{i,2}) / (\varphi_{i,2} - \varphi_{i,1})$ ,  $/i=1,5, j=1,3/$ , где  $\varphi_{i,j}, \tilde{\varphi}_{i,j}$  - значения  $i$ -го фактора на  $j$ -ом уровне в размерной и безразмерной формах соответственно.

Таблица 1

Значения факторов в размерной и безразмерной формах

№ п/п	Уровень	$k_o$	$\tilde{k}_o$	$b_o$	$\tilde{b}_o$	$R$	$\tilde{R}$	$n$	$\tilde{n}$	$b_b$	$\tilde{b}_b$
		(Н/мм)	-	(Н с/мм)	-	(мм)	-	(шт.)	-	(Н с/мм)	-
1	нижний	1	-1	0,005	-1	33,8	-1	2	-1	$5 \cdot 10^{-5}$	-1
2	средний	2	0	0,025	0	50,8	0	3	0	$2,75 \cdot 10^{-4}$	0
3	верхний	3	1	0,045	1	67,8	1	4	1	$5 \cdot 10^{-4}$	1

В общем случае для исследования зависимостей (2) нужно проводить  $3^5 = 241$  эксперимент. Поэтому рассмотрена одна из упрощенных схем планирования эксперимента (схемы Бокса-Бенкена) - двухблоковая схема для 5 факторов и трех уровней. В безразмерном виде она представлена во 2-ой колонке табл. 2. Здесь «-» и «+» обозначают соответственно -1 и 1. Смысл комбинаций, представленных во 2-ой колонке, следующий: 3-ем факторам из 5 ( $C_5^3 = 10$  вариантов) даются нулевые значения (0,0,0), а значения остальных двух - комбинируют на верхнем +1 и нижнем -1 уровнях (4 варианта) - всего 40 экспериментов. Еще один эксперимент проводится на нулевом уровне всех факторов. Получаем 41 эксперимент.

Для определения эффективности модернизации соковыжималки составлен также план проведения экспериментов на 3D модели при отсутствии шаров в автобалансирующей (табл. 2, 4-я колонка) - в схемах 2-ой колонки отброшены значения двух последних факторов. При этом для большей полноты эксперимента оставлен фак-

тор  $R$  - радиус беговой дорожки, влияющий на массу автобалансира. Получаем 19 различных наборов значений трех факторов (выделены серым фоном).

8. Результаты многофакторного эксперимента

В табл. 2 показаны результаты многофакторных экспериментов, соответствующих выбранным планам и значениям факторов, при наличии шаров в автобалансирующей (3-я колонка) и при их отсутствии (5-я колонка).

Таблица 2

План и результаты многофакторного эксперимента

№ п/п	Схема exper.	$\tilde{a}_y$	Схема exper.	$\tilde{a}_y^0$	$\tilde{a}_y^0 / \tilde{a}_y$
1	0 0 -- -- 0	7524,81	0 0 --	63024,13	8,38
2	0 0 -- + 0	7113,86	0 0 --	63024,13	8,86
3	0 0 + -- 0	7094,29	0 0 +	60348,77	8,51
4	0 0 + + 0	6787,72	0 0 +	60348,77	8,89
5	0 -- 0 0 --	7190,71	0 -- 0	62607,93	8,71
6	0 -- 0 0 +	7190,41	0 -- 0	62607,93	8,71
7	0 + 0 0 +	6603,45	0 + 0	59241,68	8,97
8	0 + 0 0 --	6603,49	0 + 0	59241,68	8,97
9	-- + 0 0 0	6440,09	-- + 0	58645,45	9,11
10	-- -- 0 0 0	6973,50	-- -- 0	61682,39	8,85
11	+ -- 0 0 0	7420,09	+ -- 0	63589,50	8,57
12	+ + 0 0 0	6775,91	+ + 0	59887,54	8,84
13	+ 0 0 0 --	7208,49	+ 0 0	62331,07	8,65
14	-- 0 0 0 --	6801,89	-- 0 0	60665,99	8,92
15	-- 0 0 0 +	6801,51	-- 0 0	60665,99	8,92
16	+ 0 0 0 +	7207,87	+ 0 0	62331,07	8,65
17	+ 0 -- 0 0	7482,63	+ 0 --	63903,33	8,54
18	-- 0 -- 0 0	7059,80	-- 0 --	62196,52	8,81
19	0 0 -- 0 --	7266,28	0 0 --	63024,13	8,67
20	0 0 -- 0 +	7264,64	0 0 --	63024,13	8,68
21	0 -- -- 0 0	7466,72	0 -- --	64176,67	8,60
22	0 + -- 0 0	6853,62	0 + --	60759,47	8,87
23	0 + + 0 0	6513,26	0 + +	58090,16	8,92
24	0 -- + 0 0	7097,19	0 -- +	61501,70	8,67
25	-- 0 + 0 0	6711,04	-- 0 +	59548,00	8,87
26	+ 0 + 0 0	7114,01	+ 0 +	61204,22	8,60
27	0 0 + 0 --	6903,65	0 0 +	60348,77	8,74
28	0 0 + 0 +	6904,93	0 0 +	60348,77	8,74
29	0 0 0 -- --	7211,24	0 0 0	61472,34	8,52
30	0 0 0 -- +	7211,77	0 0 0	61472,34	8,52
31	0 -- 0 -- 0	7410,79	0 -- 0	62607,93	8,45
32	0 + 0 -- 0	6802,05	0 + 0	59241,68	8,71
33	-- 0 0 -- 0	7008,26	-- 0 0	60665,99	8,66
34	+ 0 0 -- 0	7428,29	+ 0 0	62331,07	8,39
35	+ 0 0 + 0	7071,05	+ 0 0	62331,07	8,81
36	-- 0 0 + 0	6672,68	-- 0 0	60665,99	9,09
37	0 -- 0 + 0	7057,59	0 -- 0	62607,93	8,87
38	0 + 0 + 0	6479,79	0 + 0	59241,68	9,14
39	0 0 0 + --	6868,18	0 0 0	61472,34	8,95
40	0 0 0 + +	6868,72	0 0 0	61472,34	8,95
41	0 0 0 0 0	6997,01	0 0 0	61472,34	8,79



## 9. Анализ результатов многофакторного эксперимента

### 9. 1. Определение эффективности работы автобалансира

В 6-ой колонке таблицы 2 показаны отношения соответствующих значений установившегося виброускорения для 3D модели с шарами и без шаров в автобалансире. Наличие шаров в автобалансире в зависимости от значений параметров эксперимента уменьшает установившееся виброускорение от 8,39 до 9,14 раз.

### 9. 2. Анализ установившегося виброускорения 3D модели при наличии шаров в автобалансире

Статистический анализ результатов эксперимента, приведенных в 3-ей колонке табл. 2, проведен с помощью программы STATISTICA\_6 для моделей регрессии (2). Использованы два основных показателя – критерий Стьюдента ( $t$ -критерий) и критерий Фишера (F-критерий). При этом модель, учитывающая взаимное влияние первого порядка, выявилась неэффективной – статистически значимыми в ней есть только те коэффициенты регрессии, которые вошли в линейную часть. Регрессия для двух других моделей имеет вид:

$$a_{ул} = 7011,3 + 202,5\tilde{k}_o - 296,0\tilde{b}_o - 181,6\tilde{R} - 173,2\tilde{n}; \quad (3)$$

– квадратичная регрессия

$$a_{ук} = 6998,1 + 202,5\tilde{k}_o - 296,0\tilde{b}_o - 181,6\tilde{R} - 173,2\tilde{n} - 27,7\tilde{k}_o\tilde{b}_o + 7,3\tilde{b}_o\tilde{R} + 7,7\tilde{b}_o\tilde{n} + 26,1\tilde{R}\tilde{n} + 6,0\tilde{k}_o^2 - 102,2\tilde{b}_o^2 + 87,8\tilde{R}^2 + 42,2\tilde{n}^2. \quad (4)$$

В обеих моделях отсутствует фактор  $\tilde{b}_b$ , то есть, как и предполагалось, установившееся виброускорение статистически не зависит от сил вязкого сопротивления, препятствующих относительно движению шаров.

### 9. 3. Исследование моделей регрессии на наименьшее и наибольшее значение

1. Линейная модель. В подпространстве  $(\tilde{k}_o, \tilde{b}_o, \tilde{R}, \tilde{n})$  функция (3) принимает наименьшее и наибольшее значения соответственно в точках  $(-1; 1; 1; 1)$ ,  $(1; -1; -1; -1)$  и они равны  $(a_{ул})_{наим} = 6158,0 \text{ мм/с}^2$ ,  $(a_{ул})_{наиб} = 7864,6 \text{ мм/с}^2$ . Эксперименты, проведенные при указанных наборах параметров дали результаты  $\tilde{a}_y = 6249,4 \text{ мм/с}^2$  и  $\tilde{a}_y = 7965,5 \text{ мм/с}^2$  соответственно.

2. Квадратичная модель. Для функции (4) на области изменения факторов имеем

$$(\tilde{a}_{ук})'_{\tilde{k}_o} = 202,5 - 27,7\tilde{b}_o + 12,0\tilde{k}_o \geq 162,8;$$

$$(\tilde{a}_{ук})'_{\tilde{b}_o} = -296,0 - 27,7\tilde{k}_o + 7,3\tilde{R} + 7,7\tilde{n} - 204,4\tilde{b}_o \leq -48,9;$$

$$(\tilde{a}_{ук})'_{\tilde{n}} = -173,2 + 7,7\tilde{b}_o + 26,1\tilde{R} + 84,4\tilde{n} \leq -55,$$

то есть данная функция монотонно возрастает по фактору  $\tilde{k}_o$  и - убывает по факторам  $\tilde{b}_o, \tilde{n}$ . Поэтому наименьшее и наибольшее значения по указанным

параметрам она принимает, когда  $(\tilde{k}_o, \tilde{b}_o, \tilde{n}) = (-1; 1; 1)$  и  $(\tilde{k}_o, \tilde{b}_o, \tilde{n}) = (1; -1; -1)$  соответственно. При этом уравнения регрессии для целевой функции имеют вид

$$(\tilde{a}_{ук})_{наим} = 6307,8 - 148,2\tilde{R} + 87,8\tilde{R}^2 \text{ и}$$

$$(\tilde{a}_{ук})_{наиб} = 7651,2 - 214,6\tilde{R} + 87,8\tilde{R}^2. \quad (5)$$

Первая функция в (5) принимает наименьшее значение при  $\tilde{R} = 0,84$ , а вторая – наибольшее при  $\tilde{R} = -1$ . Эти значения равны соответственно

$$(a_{ук})_{наим} = 6245,3 \text{ мм/с}^2, (\tilde{a}_{ук})_{наиб} = 7953,6 \text{ мм/с}^2.$$

Эксперимент, проведенный при значениях факторов  $(-1; 1; 0,84; 1; 0)$  дал результат  $\tilde{a}_y = 6255,3 \text{ мм/с}^2$ , а при  $(1; -1; -1; -1)$  - см. п. 1).

Заметим, что обе модели дали очень близкие или совпадающие оптимальные точки, но в квадратичной функции точность прогнозирования наименьшего и наибольшего значения на порядок выше, соответственно 1,5 %, 1,3 % (линейная регрессия) и 0,15 %, 0,13 % (квадратичная регрессия).

Таким образом, наименьшее и наибольшее значения установившегося виброускорения 3D модели соков выжималки равны соответственно  $\tilde{a}_{наим} = 6249,4 \text{ мм/с}^2$ ,  $\tilde{a}_{наиб} = 7953,6 \text{ мм/с}^2$  и достигаются в точках  $(k_o, b_o, R, n) = (1 \text{ Н/мм}; 0,45 \text{ Нс/мм}; 67,8 \text{ мм}; 4)$ ,  $(k_o, b_o, R, n) = (3 \text{ Н/мм}; 0,005 \text{ Нс/мм}; 33,8 \text{ мм}; 2)$  и не зависят от коэффициента сил вязкого сопротивления движению шаров  $b_b$ .

Таким образом, предложенная методика оптимизации параметров позволяет уменьшить установившееся виброускорение 3D модели соковыжималки на 21,4 % от максимального.

### 9. 4. Анализ установившегося виброускорения 3D модели при отсутствии шаров в автобалансире

Статистический анализ результатов эксперимента, приведенных в 5-ей колонке табл. 2, проведен аналогично п.п. 9.2, 9.3 при отсутствии факторов  $\tilde{n}, \tilde{b}_b$ . Модель, учитывающая взаимное влияние первого порядка, также оказалась неэффективна. Регрессия двух других моделей имеет вид:

$$\tilde{a}_{ул} = 61122,24 + 814,05\tilde{k}_o - 1685,88\tilde{b}_o - 1334,02\tilde{R}; \quad (6)$$

$$\tilde{a}_{ук} = 61285,69 + 814,05\tilde{k}_o - 1685,88\tilde{b}_o - 1334,02\tilde{R} - 165,50\tilde{k}_o\tilde{b}_o + 27,66\tilde{k}_o^2 - 548,34\tilde{b}_o^2 + 210,13\tilde{R}^2. \quad (7)$$

Функции (6), (7) монотонно возрастают по фактору  $\tilde{k}_o$  и - убывают по факторам  $\tilde{b}_o, \tilde{R}$ , поэтому наименьшее значение принимают в точке  $(\tilde{k}_o, \tilde{b}_o, \tilde{R}) = (-1; 1; 1)$ . При этом они равны, соответственно

$$(\tilde{a}_{ул})_{наим} = 57288,29 \text{ мм/с}^2, (\tilde{a}_{ук})_{наим} = 57306,68 \text{ мм/с}^2.$$

Экспериментальное значение установившегося виброускорения при найденных значениях факторов равно  $\tilde{a}_y = 57395,01 \text{ мм/с}^2$ . Последнее значение на 1,2 % меньше минимального из значений табл. 2 - 58090,16 мм/с<sup>2</sup> (23-тая строка) и отличается от про-

гнозированных на 1,3 %, 1,4 %, соответственно, для линейной и квадратичной моделей регрессии.

Таким образом, наименьшее значение установившегося виброускорения 3D модели соковыжималки при отсутствии шаров в автобаланси́ре достигается при  $(k_o, b_o, R, n) = (3 \text{ Н/мм; } 0,005 \text{ Нс/мм; } 67 \text{ мм})$  и равно  $\ddot{a}_y = 6255,3 \text{ мм/с}^2$ .

Из п.п. 9.3, 9.4, следует, что наличие автобаланси́ра при оптимальных значениях его параметров уменьшает установившееся виброускорение в 9,17 раза. При этом оптимальные параметры опор соковыжималки минимизируют ее установившиеся виброускорения как при наличии, так и при отсутствии шаров в автобаланси́ре.

## 10. Выводы

Описанную методику можно рассматривать как стандартную при оптимизации параметров автоба-

ланси́ра путем планирования и проведения многофакторных экспериментов как реальных, так и виртуальных.

С ее использованием для 3D модели центробежной соковыжималки с автобаланси́ром получены такие результаты:

- наличие шаров в автобаланси́ре уменьшает установившееся виброускорение в среднем в 8,7 раз (от 8,38 до 9,11 раз), а при оптимальных значениях параметров – в 9,17 раза;
- эффективными для аппроксимации являются линейное и квадратичное уравнения регрессии, они дают близкие оптимальные значения параметров, но линейная функция менее точна в аппроксимации величин установившегося виброускорения;
- предложенная методика оптимизации параметров автобаланси́ра позволила уменьшить установившееся виброускорение на 21,4 % от максимального.

## Литература

1. Гусаров, А. А. Автобалансирующие устройства прямого действия [Текст] / А. А. Гусаров. – М.: Наука, 2002. – 119 с.
2. Філімоніхін, Г. Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами [Текст] / Г. Б. Філімоніхін. – Кіровоград: КНТУ, 2004. – 352 с.
3. Нестеренко, В. П. Автоматическая балансировка роторов приборов и машин со многими степенями свободы [Текст] / В. П. Нестеренко. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1985. – 84 с.
4. Rodrigues, D. J. Automatic two-plane balancing for rigid rotors [Text] / D. J. Rodrigues, A. R. Champneys, M. I. Friswell, R. E. Wilson // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2008. – Vol. 43, Issue 6, July – P. 527-541.
5. Гончаров, В. В. Технічні рішення із зрівноваження на ходу екстракторів відцентрових соковыжималок [Текст] / В. В. Гончаров, Г. Б. Філімоніхін // Загальнодержавний міжвідомчий н.-т. збірник “Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин”. – 2013. - Вип. 43, Ч. I. - С. 257–262.
6. Летаев, Д. А. Бытовые электроприборы для кухни [Текст] : справ. пособие / Д. А. Летаев. – Москва: Легпромбытиздат, 1992. – 96 с.
7. Партала, О. Н. Справочник по ремонту бытовых электроприборов [Текст] / О. Н. Партала. - СПб: Наука и техника, 2010. – 400 с.
8. Филимонихин, Г. Б. Стенд центробежной соковыжималки с автобаланси́ром для определения оптимальных значений параметров автобаланси́ра [Текст] / Г. Б. Филимонихин, В. В. Гончаров // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2013. - вып. 70. - С. 22–27.
9. Гончаров, В. В. 3D моделирование динамики центробежной соковыжималки с шаровым автобаланси́ром [Текст] / В. В. Гончаров, Г. Б. Филимонихин // “Технологічний аудит та резерви виробництва”. – 2013. - т.6, №. 1 (14). - С. 15–18.
10. Алямовский, А. А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks [Текст] / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 784 с.
11. Kuang-Hua Chang. Motion Simulation and Mechanism Design with COSMOSMotion 2007 [Text]. Paperback: 142 pages. Publisher: Schroff Development Corporation. - 2008. - ISBN – 10: 1585034827.
12. Математическая теория планирования эксперимента [Текст] / С. М. Ермаков, В. З. Бродский, А. А. Жиглявский и др.; под общей редакцией С. М. Ермакова. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983.- 392 с.
13. Халафян, А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных [Текст] : учеб. / А. А. Халафян. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 512 с.